

宇宙惑星科学

牧野淳一郎

惑星学専攻

事務連絡

- 今日は通常講義+最終レポート。
- 授業振り返りアンケートに協力を、とのこと。

事務連絡

- 評価は小テスト (初回はなし) (レポートはなし)
- 連絡は **BEEF** か状況によって **Google Classroom** を使うので、**Gsuite** のアカウントを有効にしておくこと。「宇宙惑星科学1」の招待がいつているはずである。

講義概要

1. ビッグバン宇宙論: **2**コマ分くらい
2. 天体形成 (主に銀河): **2**コマ分くらい
3. 星形成・進化、惑星形成: **3**コマ分くらい

講義の目的

- 惑星形成を、宇宙における階層的構造形成全体の中で理解する
- 同時に、惑星形成研究を天文学・天体物理学研究の中で位置付ける
- そのために宇宙の始まり、銀河等の天体形成、星形成、惑星形成の順にトップダウンで話を進める

ビッグバン宇宙論

- 宇宙論の歴史
- 現在の描像
- 残っている問題
 - － インフレーション
 - － ダークマター
 - － ダークエネルギー

天体形成

- 大規模構造・重力不安定 (ジーンズ不安定)
- 重力熱力学的不安定
- 円盤構造、軸対称不安定、スパイラルモード
- 銀河形成
- 銀河と太陽

星形成と惑星形成

- 星形成
 - 星形成を考えるいくつかの立場
 - 初代星
- 恒星進化
 - 星の一生
 - 中性子星・ブラックホール・重力波
- 惑星形成の標準ないし京都/林モデル
 - **minimum solar nebula model**
 - シナリオ紹介
 - 理論的問題
 - わかっていないこと

クェーサーと初代星

- 初代星は(次に述べるように)銀河・クェーサーより(平均的には)先にできる
- が、確率的な話なので非常に早くできる銀河もある。クェーサー(ブラックホール)もできるかも(色々シミュレーションや議論はある)
- 現在のところ、どちらか再電離に寄与したかはよくわかっていない(どちらもそれなりに的的な話になっている)

初代星の形成

- 現在のところ、一般的理解: 「初代星」はどうやってできたと考えられているか:
 - ダークマターハローは、非常に質量が小さいもの同士の合体で成長していく。(地球質量くらいから?これはダークマター粒子の正体、質量で変わる)
 - バリオンは太陽質量の**10**万倍程度のダークハローができて初めて重力収縮を始める(と考えられている)。それより小さいスケールのバリオンの密度ゆらぎは光子との相互作用でならされるため。
 - ダークマターハローの中心に、太陽質量の数十から数百倍の星ができる

初代星の形成—シミュレーション

- **15**年くらい前から精力的にシミュレーション研究がされてきた
- 当初は、ハローの中心に一つ星ができるという「シミュレーション結果」だった
- 最近は**2**つに分裂するとかいや小さいのが沢山できるとか色々なシミュレーション結果があって混乱中
- 初期条件の(理論的な)違いではなくて、計算手法や「問題ない」としているはずの簡略化、計算精度等の影響(「いれ忘れていた初期条件」なんてのもある)

星形成の理解の現状

- 「星間ガスが冷えて、重力収縮して星になる」のは間違いない。
- 具体的にどんなふうにして重力不安定を起こすガスができるのかは銀河形成・進化とカップルした問題。まだ非常に良くわかっているわけではない。
- 初期条件についてはよくわかっていると考えられる初代星でも、まだシミュレーションやる人によってできる星が違う状態。

恒星進化

- 星の一生・内部構造
- 中性子星・ブラックホール・重力波

星の一生・内部構造

星形成は謎が多いができたあとはかなりよくわかっている。以下まず大雑把な話

- 中心の密度・温度が十分上がると、水素の核融合が始まって「主系列星」に
- 主系列星段階の寿命: 大質量星で数百万年。太陽くらいだと **100** 億年
- 中心で水素燃焼が終わる (全部ヘリウムになる) と、ヘリウムの核融合が始まる。この時には赤色巨星になり、半径が不安定な振動を起こしたりする (変光星)
- 太陽質量の **8** 倍以下の恒星は炭素・酸素から先には核融合が進まない。ヘリウムがなくなると白色矮星になる
- 太陽質量の **8** 倍以上では、核融合がさらに進み、最終的に鉄までいくが、鉄コアの温度がさらに上がると一気にヘリウムに分解する吸熱反応が起きてコアが重力崩壊し、II型超新星になる。超新星のあとには中性子星ないしブラックホールが残る。

もうちょっと詳しい話

- 内部構造の基本方程式
- 主系列星の質量と光度の関係
- 主系列の後の進化

内部構造の基本方程式

球対称で定常な星の構造は、

- 質量保存の式
- 静水圧平衡の式
- 状態方程式
- エネルギー生産と輸送の式

で決まる。この辺をまずだしておく。

質量保存の式

半径を r 、密度を ρ 、ある半径の内側の質量を M_r とすれば

$$\frac{dM_r}{dr} = 4\pi r^2 \rho \quad (1)$$

これは特に難しいところはない？半径 r から $r + dr$ の範囲の体積は半径 r の球の表面積 $4\pi r^2$ に厚さ dr を掛けたものなので、質量はそれにさらに単位体積あたりの質量である ρ を掛けたもの。

静水圧平衡の式

さらに圧力を p として

$$\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dr} = -\frac{GM_r}{r^2} \quad (2)$$

さて、これはどういう式だったかということ、、、高踏的な説明は、「流体は圧力勾配から力を受ける。星の静水圧平衡ではそれが重力と釣り合う」というもの。

もうちょっと丁寧なつもりの説明: 半径 r から、 $r - dr$ に下がった時にどれだけ圧力が増えるかを考える。そこでの重力加速度が g なら、新しく上に載ることになる流体の質量は ρdr であり、重力の増加は $g\rho dr$ である。これが圧力の増加 dp と等しい。なので $dp/dr = -\rho g$ 。ここで $g = GM_r/r^2$ なので上の式になる。

状態方程式

これは、温度はそこそこ高くて電離した理想気体の方程式で、温度が高いと輻射圧(光子の圧力)も無視できないので

$$p = \frac{\rho k T}{\mu m_H} + \frac{a T^4}{3} \quad (3)$$

ここで k はボルツマン定数、 a は輻射定数、 m_H は水素原子の質量、 μ は平均分子量である。

地球上なら理想気体といえば話は簡単だが、恒星内部で高温だと、原子の電離状態が組成、温度、密度の関数になるので少し複雑である。輻射圧は、あとで述べるような理由で大質量星では重要になる。

エネルギー生産の式

エネルギー生産：熱核反応。

- 主系列星の中心温度： 10^7K 程度。 $1\text{eV} \sim 10^3kT$ なので **10keV** 程度。
- 核融合反応ででるエネルギーは **10MeV** 程度。なので、 10^{10}K くらいまで温度が上がらないと普通には核融合は起きない(これは何故核融合炉は難しいかという話)

エネルギー生産の式(2)

- 「普通には」起きないが、量子力学的効果(トンネル効果)でほんのちょっとだけ起きる。
- おきやすさ: $\exp(-\sqrt{E_G/E})$ くらい。 E_G が量子力学的な効果を表す係数で単位はエネルギー、 E は**2**つの原子核の相対運動のエネルギー
- 原子核のエネルギーの分布はマックスウェル・ボルツマン分布なので $\exp(-\frac{E}{kT})$ になる

エネルギー生産の式(3)

このため、典型的に反応が起こるところは、 $\exp(-\sqrt{E_G/E}) \exp(-\frac{E}{kT})$ が最大値をとるところで、これの対数をとって E で微分して 0 になるところを求めると、

$$\frac{1}{2} \sqrt{E_G} E^{-3/2} - \frac{1}{kT} = 0 \quad (4)$$

から

$$E = E_0 = \left(\frac{\sqrt{E_G} kT}{2} \right)^{2/3} \quad (5)$$

エネルギー生産の式(4)

で、この時の値は

$$\exp\left(-\frac{3E_0}{kT}\right) \quad (6)$$

になる。ここで、 E_G は kT よりはるかに大きいので、 E_0 も kT よりかなり大きくなる。

E_0 が kT よりずっと大きいということには、恒星の核融合反応には、エネルギーがマックスウェル・ボルツマン分布の典型的な値よりずっと大きな、非常に少数の原子核だけが関わっている、ということである。

このことから色々重要な帰結がでてくるが、まずその前に核融合反応の紹介。

核融合反応

恒星の中で起こる核融合の主要なものは水素原子核**4**個からヘリウム原子核ができる反応で、 $p-p$ チェーンと**CNO**サイクルが主要な反応である。

- $p-p$ チェーンは水素原子核(陽子)だけがあればできる。陽子**2**個から重水素、重水素と陽子からヘリウム**3**ができ、ヘリウム**3**同士からヘリウム**4**と陽子**2**個になる。
- もうちょっと温度が高いとか、ヘリウム**4**の量が多いとかすると、ヘリウム**3**と**4**の融合でベリリウム**7**ができ、それが電子捕獲でリチウム**7**になり、さらにリチウムが水素と反応して**2**つのヘリウム**4**になる。あるいは、ベリリウム**7**が陽子捕獲してベリリウム**8**になり、これが分裂して**2**つのヘリウム**4**になる。

CNO サイクル

星があらかじめ **C, N, O** 等の元素をもっていると、それらが触媒として働く、要するに ^{12}C から **3** 個陽子を捕獲して ^{15}N になり、これが陽子と反応して ^{12}C と ^4He に戻る反応が起こる。

これを **CNO** サイクルという。

水素燃焼の先

- 水素燃焼は数千万度 (**1-2** 千万度でも) 起こる。
- 水素がほぼなくなったあと、恒星の中心の温度が **1** 億度程度まであがると、ヘリウム **4** の燃焼が起こる。これは、 ^{12}C と ^{16}O を作る。
- さらにもっと高温になると、炭素、酸素がそれぞれ核融合を始める。
- さらにもっと高温になると、最終的には ^{56}Fe まで進む。
- ^{56}Fe は「核子あたりのエネルギー」が最小の原子核で、そこから先はエネルギーが増える (吸熱反応になる) のでここで普通の核融合は終わり。
- 鉄から先は、超新星爆発や中性子星の合体の時にできる。

エネルギー輸送の式

恒星の中でエネルギーが運ばれる主要なメカニズムは輻射と対流である。まず輻射について。

表面近くを別にすると、星は「光学的に厚い」つまり、光学的厚さが1よりはるかに大きい。この時、光子は拡散的に振舞う。つまり、多数の原子核とぶつかってランダムウォークをしている。

エネルギー輸送の式(2)

このため、輻射によるエネルギー輸送は熱伝導と同様、温度勾配に比例して

$$L_r = -4\pi r^2 \left(\frac{4acT^3}{3\kappa\rho} \right) \frac{dT}{dr} \quad (7)$$

となる。ここで、 L_r は半径方向のエネルギー流速、 a は輻射定数(既にててきた)、 c は光速、 κ は吸収係数である。

本当は光子のエネルギーには波長方向の分布があって吸収係数も波長依存性がある。ここでの κ は波長方向の平均(ロスランド平均という特別なもの)をとったものである。

普通の熱伝導と同じ？

といったけどなんか式は変ではないか？単純な熱伝導なら、何か熱伝導の係数 C があって

$$L_r = -4\pi r^2 C \frac{dT}{dr} \quad (8)$$

となる。なので、輻射輸送の式は

$$C = \frac{4acT^3}{3\kappa\rho} \quad (9)$$

となっていることを意味する。なぜそうなるかを簡単に説明しておく。

輻射輸送の係数の意味

c は光速である。熱流が光速に比例するのは、動いている光子が熱を運ぶのでそういうことになる。

$4aT^3$ は、輻射の体積あたりのエネルギーが $4aT^4$ であることからくる。普通の熱伝導ではエネルギーは T に比例するだけなので、輻射のエネルギーは T^3 に比例して普通の熱エネルギーより大きい。

$\kappa\rho$ は光子の吸収されやすさなので、小さいと光子が遠くまで物質とぶつかることなく飛ぶ。このため、小さいと流れる熱は大きくなる。ある程度密度が高いと、 $\kappa \propto \rho$ である。これは、吸収ではなく輻射のほうを考えるとわかる。輻射はイオンと電子の衝突による。1つのイオンが単位時間に衝突する回数は密度に比例する。

対流

- 普通の気体や液体では、下から上にエネルギーを運ぶ主要なメカニズムは対流である。
- 粘性が大きくない対流では、温度・密度構造は断熱的(等エントロピー的)になる
- これは、対流に対して、断熱温度勾配は中立安定であるため。断熱温度勾配より小さい勾配であれば対流は起きない。
- 星のある程度温度が高いところでは、輻射によるエネルギー輸送が非常に効率的になるため、対流が起こらない。
- 極度に小さい星を除いては、星の(質量で)大部分は輻射でエネルギーが輸送される。

対流(2)

- 前回話をした林フェーズでは全体が対流的。これは温度が低いため。
- **CNO** サイクルになると、中心付近の一部が対流的になる
- 外側のちょっとは必ず対流的になるが、星の構造・高度には(林フェーズや巨星段階以外は)あまり影響がない。

星の内部構造・進化の方程式のまとめ

まとめると、エネルギー生産以外は、対流がおこっているところを無視すると

$$\frac{dM_r}{dr} = 4\pi r^2 \rho \quad (10)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dr} = -\frac{GM_r}{r^2} \quad (11)$$

$$p = \frac{\rho k T}{\mu m_H} + \frac{a T^4}{3} \quad (12)$$

$$L_r = -4\pi r^2 \left(\frac{4acT^3}{3\kappa\rho} \right) \frac{dT}{dr} \quad (13)$$

星の内部構造・進化の方程式のまとめ(2)

状態方程式は、非常に大質量の星以外では輻射圧優勢にはならない。

エネルギー生産は、「温度に敏感にエネルギー生産が変わる」という性質のため、近似的には、星の中心温度は**1-2**千万度で、外側に流れるのに必要なだけのエネルギーが生産される、と考えてよい。

恒星の質量-光度関係

ここまでの議論から、星の質量と明るさの間関係を導くことができる。以下その議論をする。

まず、星の中心温度は質量によらずに一定とする。これは厳密に正しいわけではないが、上でみたようにまあそんなに大きくは違わない。ある質量 M の星の密度分布が

$$\rho = \rho_0 f(r/r_0) \quad (14)$$

で与えられたとしよう。これは、密度から質量分布、圧力、温度、と順番に求めていって、熱流 L_r が半径によらず一定になる、ということである。

恒星の質量-光度関係 (2)

さて、そうなっていると、密度や半径を適当にスケールした、

$$\rho = \rho_1 f(r/r_1) \quad (15)$$

も、熱流が一定になる、という意味で解にはなっている。

但し、 ρ_1/ρ_0 と r_1/r_0 の間に何か関係をつけないと、中心温度が変わってしまい、条件としてつけた中心温度一定をみたさない。

恒星の質量-光度関係 (2)

例えば、星の半径を a 倍にしてみよう。これは、 $r_1/r_0 = a$ ということである。この時に、中心密度が x 倍になったとする。星の質量は a^3x 倍であり、圧力勾配は同じ相対位置のところで r^2 の分が a^{-2} 、質量は a^3x 、密度は x 倍なので ax^2 倍となり、圧力自体は**2**倍外側から積分してくるので a^2x^2 となる。つまり、温度は、状態方程式から a^2x 倍である。

つまり、温度一定であるためには、 $a^2x = 1$ でなければならないことがわかる。つまり、

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} = \left(\frac{r_0}{r_1} \right)^2 \quad (16)$$

質量と半径

星の総質量は $\rho_1 r_1^3$ に比例して、 ρ_1 は r_1^{-2} に比例するので、結局、質量が半径に比例する非常に簡単な関係

$$M \propto R \quad (17)$$

が導かれる。ここで、 M, R は星の総質量と半径である。

質量・半径と光度

では L_r はどうなるかである。同じように半径を a 倍にすることを考える。同じ相対位置で、 r^2 から a^2 、 $1/\rho$ 、 $1/\kappa$ からそれぞれやはり a^2 がでてきて、 dT/dr から $1/a$ がでてくるので、結局

$$L \propto a^5 \propto M^5 \quad (18)$$

つまり、星の明るさは質量の**5乗**に比例する、ということがわかる。

(κ が ρ に比例するのは比較的低温・高密度)

光度と表面温度

表面温度がどうなるかを考える。ここまでの議論は、実はエネルギー輸送については、「表面で温度 0 」という境界条件を仮定して解を求めたことに相当しているが、実際には太陽を見ればわかる通り有限の温度を持つ。

この温度は、ほぼ全体が輻射でエネルギーが流れている星については、表面から輻射でていくエネルギーが内部での熱流と等しい、という条件で決まる。これはシュテファン・ボルツマン則から

$$L \propto 4\pi R^2 T_s^4 \quad (19)$$

なので

$$T_s \propto M^{3/4} \quad (20)$$

である。

大質量星

星の質量が太陽あたりだとここまでの議論はそれほど悪くないが、もっと大きな星では、密度が非常に低くなるために輻射輸送に効くのが主に電子になり、この時は κ は ρ に依存しない。この領域では、ここまでの議論と同様にして

$$L \propto M^3 \quad (21)$$

になる。さらに大質量では、輻射圧が圧力の主体になる。この領域では、温度と圧力の両方が一定で、議論を省略するが、

$$L \propto M \quad (22)$$

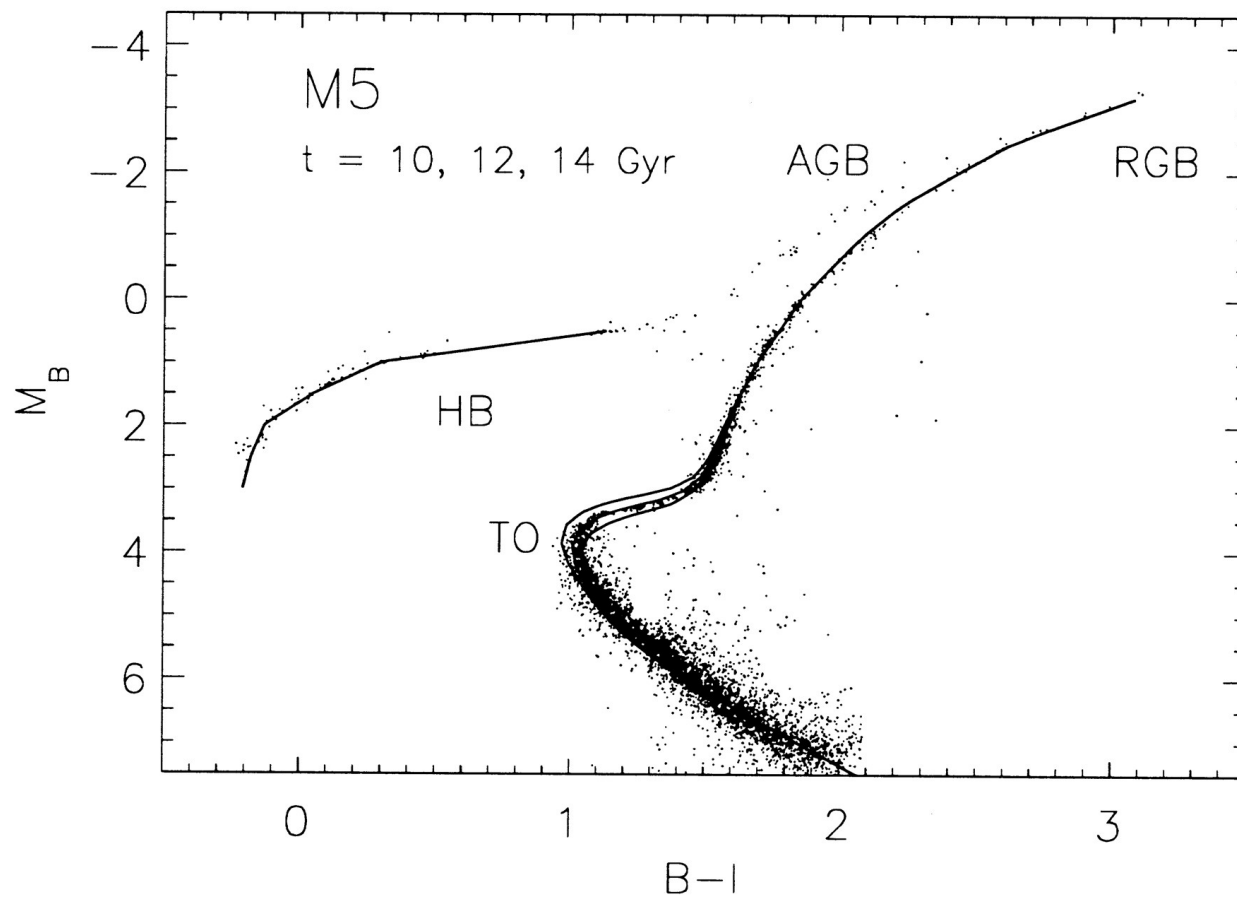
が導かれる。

色-光度関係、ないし **HR** 図

ここまでの議論から、恒星の表面温度 (実際には「表面」ではないので、「有効温度」という) と星の明るさの間には関係があり、(超大質量星を除いて) 明るいほうが温度が高いことがわかった。

これを天文学の言葉でいうと、「絶対等級で明るい星は青い」ということになる。この関係をプロットしたのが **HR** 図 (最近の論文では色-等級図、**CMD** ということが多い) である。

CMDの例



(球状星団の例なのでちょっと特殊)

主系列星

星が水素燃焼を始めて時間が立つと、段々中心の水素がなくなってくる。しかし、前に述べたように、核融合反応は温度に敏感なので、水素がほとんどなくなっても温度を少しあげれば最初と同じだけエネルギーを供給できる。

このため、水素燃焼が続いている間、**CMD** 上で恒星はほとんど同じ位置にあり、その位置はほぼ質量だけで決まる(星が持つ金属量でもちろん少し変わる)。

この、水素燃焼段階にある星を主系列星といい、**CMD** 上で主系列星が作るシーケンスを主系列という。

ある質量の星が主系列にいる時間は、理論とシミュレーションでかなり精密に決まる。

惑星形成

星形成はまだなんだかよくわからないというのが現状だが、
では惑星形成は、、、

非常に大雑把なところはわかっていると思っている。

- ガスが冷却・重力収縮して星になる。
- 角運動量が大きな成分は星に落ちないでガス円盤に
- このガス円盤がさらに冷却するかなんかしてダスト成分が集まって惑星に

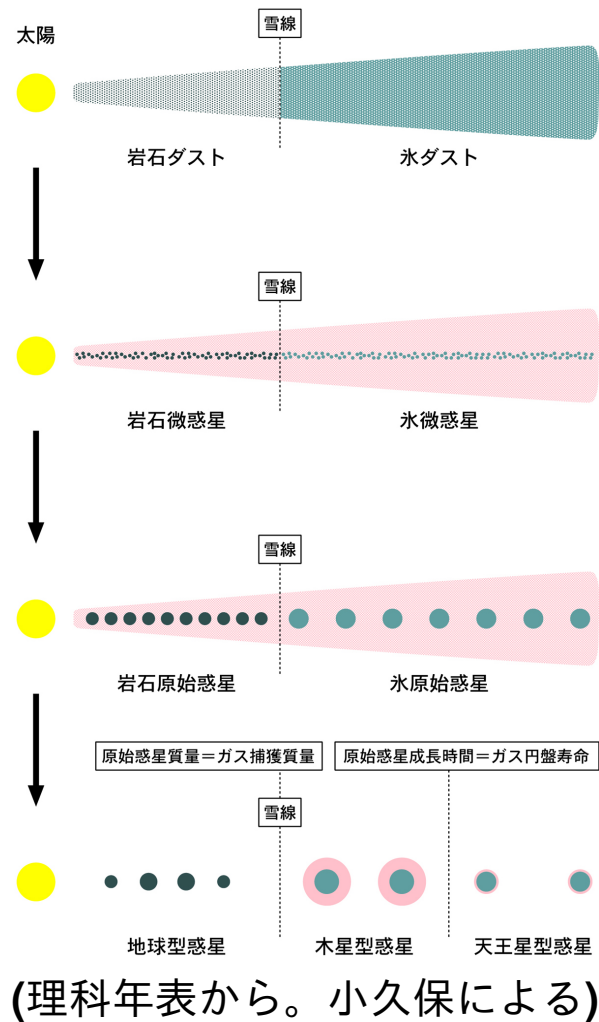
これだと、カント・ラプラスの星雲説とあんまり変わらない

21世紀の惑星形成理論

といっても基本的には **1970** 年代にできた「京都モデル」ないし「標準モデル」

- 「原始太陽系星雲」を想定: これは、大雑把には「現在ある惑星」がその場所にあるダストが集まってできたとして、最初はダストの他に水素・ヘリウムもあったとする
- その中で、ガスとダストが分離して、、、
- 詳しくは次のスライド以降で
- 大槻さんの講義でもっと詳しくやるよね？

標準的な惑星形成理論



- 太陽の周りに原始惑星系円盤。水素、ヘリウム+それ以外。
- 太陽に近いところでは水は気体。外側は氷: 惑星材料の量が違う
- ダストは赤道面に沈降、集まって「微惑星」になる。(10¹⁸g くらい)
- 微惑星同士がさらに重力相互作用で衝突・合体して「原始惑星」に(10万年くらい? 10²⁶g くらい)
- 原始惑星がさらに合体して地球型、あるいはガスを集めて木星型に

このシナリオが解決しようとした問題

- 「原始太陽系星雲」(現在の太陽系の惑星の質量をバラバラにして星雲にして、元々あったはずの水素・ヘリウムを足した仮想的なもの)からどうやって惑星ができたか
- 沢山ある困難の1つ: 小さなダストが合体して成長していくとすると、メートルサイズくらいになったところで成長速度よりガス抵抗で太陽に落ちる速度のほうが大きくなる
- 「ダスト落下問題」

ダスト落下問題

- ダストはケプラー回転する
- ガスは圧力もあり、外側のほうが圧力が小さいのでその圧力勾配の力があり、ケプラー回転よりちょっとゆっくり回る
- このために、ダストは抵抗を受ける。
- ダストが非常に小さいうちは、抵抗が非常に大きいのでガスにダストはくっついて動き、落ちない。
- ダストがすごく大きくなると、重力に比べてガスの流体力学的な抵抗は小さくなり、落ちない。
- 中途半端なサイズ(1メートルくらい)で落ちる

ダスト落下問題の「解決」

- 京都モデル: 赤道面に集まったダストが重力不安定で一気にキロメートルサイズの「微惑星」になる
- 本当にそうなるかどうかはまだ議論がある。
 - － ダストが赤道面に沈むと、赤道面近くは回転が速くなり、速度差からケルビン・ヘルムホルツ不安定が起きて円盤が乱流化するという説が有力
 - － 但し、これが本当かどうかはよくわかってはいない

次の問題

Hayashi, et al. 1985

- 微惑星から惑星へ、という基本的な描像は既にあった
- しかし、理論的には惑星ができるのに時間がかかりすぎる、という問題があった

何故時間がかかるということになっていたか？

- 惑星が成長すると成長速度が遅くなる (**1/3 乗**)
- 太陽から遠いと成長速度が遅くなる (**3 乗**)

海王星は存在しない(形成時間 **100 億年**以上)

形成時間問題への解

暴走的成長 (Wetherill and Stewart 1989)

- それまでの理解: 秩序的成長。微惑星は同じように重くなる
- 暴走的成長: 周りよりも少し重くなったものが他より速く成長してどんどん大きくなる

速く成長する理由

- 大きいので衝突断面積大きい
- 重いので、重力フォーカシングの効果も大きい
- ランダム速度が小さい(円軌道に近い)ので、重力フォーカシングの効果がさらに大きい

次の(現在未解決)問題—惑星落下問題

- 微惑星が原始惑星に成長していく途中で、やっぱりガスの抵抗でエネルギー、角運動量を失って、太陽のほうに落ちてしまう。
- 落ちないようにする都合の良いモデルもあまりない
- ガス抵抗は重力相互作用によるもの。

これも未解決

何故未解決か？

もちろん、未解決なので何故かわからない。

と、いってしまったてはしょうがない。

形成時間問題では？(後知恵で見ると、という話)

- みんなそろって大きくなる、という仮定が全然嘘だった
- が、その仮定に問題がある、とは多くの方は思ってなかった

ダスト落下問題ではどうか？

- ダスト成長時間スケール、落下時間スケールのどちらも、かなり単純なモデルによる理論的見積もり
- 実際に基礎過程からシミュレーションしたわけではない
- 理由: どうやって基礎過程からシミュレーションできるのか？だから

惑星落下問題は？

- ガス抵抗をいれた N 体計算はいくつかある
- ガス円盤自体は解かない。抵抗を式でいれる
- なので、どうしても落ちる
- 惑星一つとガス、という計算もある。これはやはり落ちる

ではこのストーリーは本当か？

- 京都モデルは「仮定」
- 系外惑星(系)は極めて多様。これは少なくとも初期条件が多様だということ。
- 京都モデルで多様性を説明できるか？
- そもそも京都モデルで太陽系を説明しないといけなのか？

系外惑星

- 系外惑星発見からの歴史
- 現在の理解と今後の発展

系外惑星発見からの歴史

- 発見以前
- 発見
- 現在まで

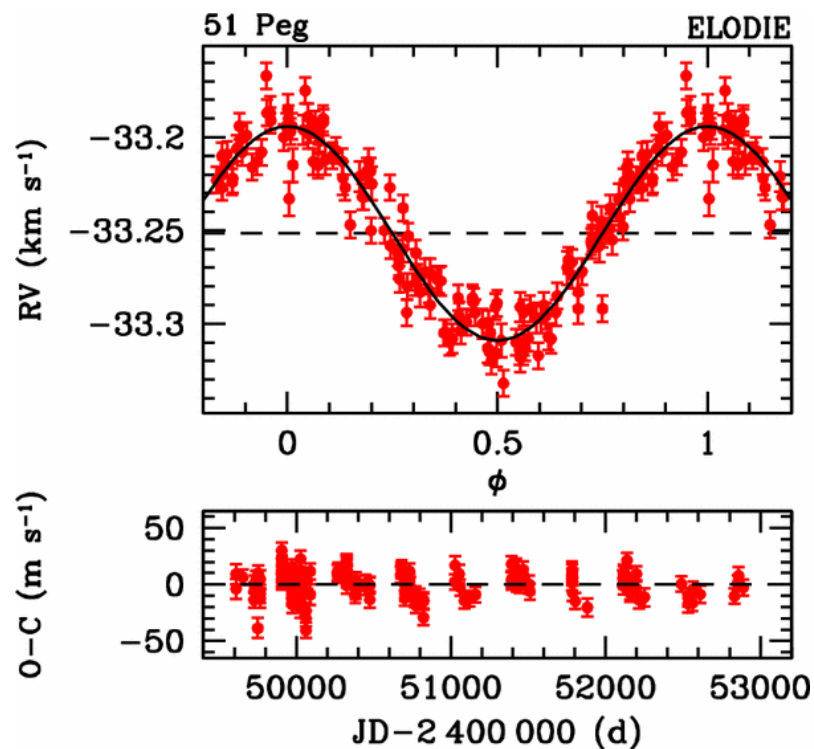
発見以前

- 太陽以外の恒星にも惑星はあるはず、とは考えられていた。
- 色々な探査の試みもあった。
- が、発見にはいたっていなかった。

「発見できなかった」という報告の例: **1995/8 Walker et al.**
21 個の恒星の **12** 年にわたる精密観測で「惑星はない」

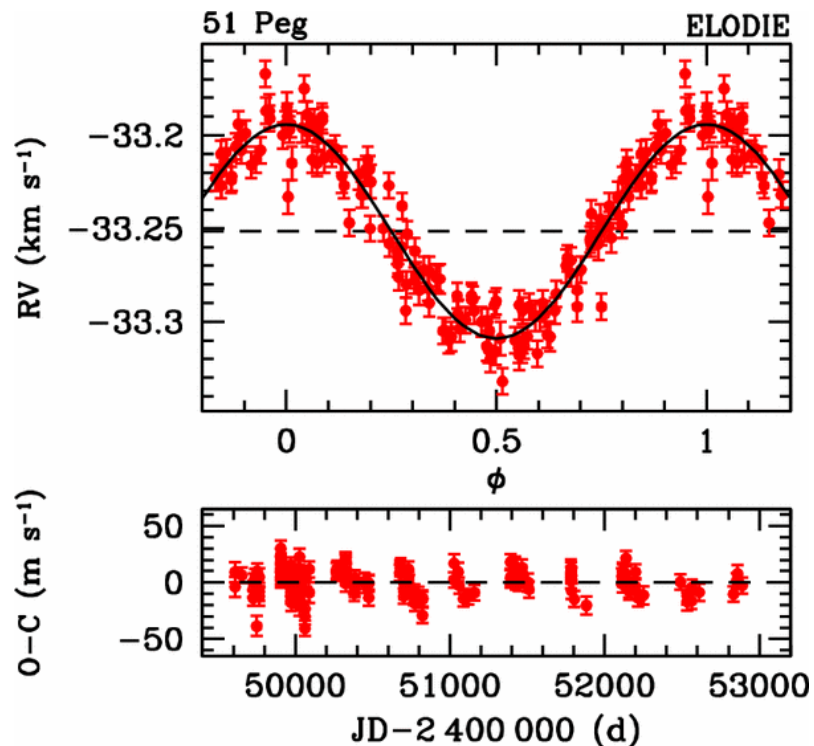
発見

- **1995/11 Mayor and Queloz:** ペガサス座 **51** 番星の周りを「**4日**」の公転周期で回る木星質量の半分程度の惑星を発見。
- 発見した方法: 視線速度法



視線速度法

- 惑星を直接観測するわけではなく、恒星の「視線速度」を精密測定
- 視線速度：我々に近づく/遠ざかる方向の速度
- この星の場合最大 70m/s 程度の变化。
- 視線速度の観測：ドップラー効果によるもの。恒星からの光の「吸収線」の位置のずれを観測(前にでてきた赤方変移と原理は同じだがものすごく小さい量)



発見の経緯

- **Mayor** は元々連星系の研究者。1994年から惑星探査を開始(そのために新しい分光器を開発)
- 95年1月にはペガサス座**51**番星で速度変化発見。追加調査のあと8月に**Nature**に投稿。9月には再観測も。11月に論文掲載
- 論文掲載のすぐあと、アメリカの2グループ (**Marcy and Butler, Noyes and Brown**) が検証
- 当初は、これは惑星ではなく恒星大気の脈動ではという説もあったが、色々な状況証拠、他の惑星の発見で否定。
- **Marcy** たちは、1995/11 から半年の間に**6**個もの惑星を発見。

なぜ **Mayor** たちが最初に発見できたか？

- **Marcy** たちはその前の 7 年にわたって **100** 個の恒星の観測をしていた。
- が、そもそも「**4日**」というようなどてつもなく短い公転周期の巨大惑星が存在しているとは想像もしていなかった。木星は **12** 年。
- もちろん、太陽にも水星のような周期の短い惑星があるが、小さく、軽いので視線速度法では発見できないと考えられていた。
- **Mayor** たちは連星系の研究者だったので、(おそらく)何も考えないで周期の短いところから観測した。

「思い込み」が発見を妨げた例

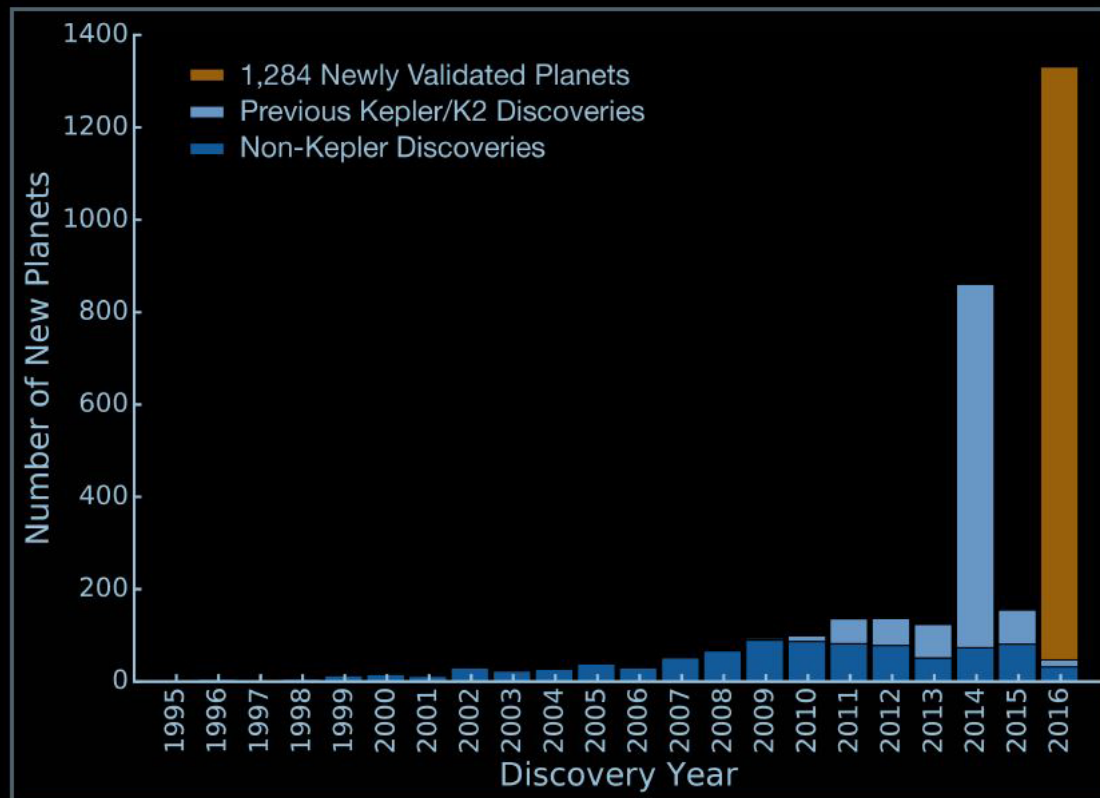
「木星は遠くにしかできない」という「理論」もあった、、、

(全く余談: **Marcy** は **2015** 年、大学院生、ポスドクへのセクハラで処分。アメリカでは有名教授がセクハラで処分される事例は結構ある)

その後の発展

Exoplanet Discoveries Through the Years

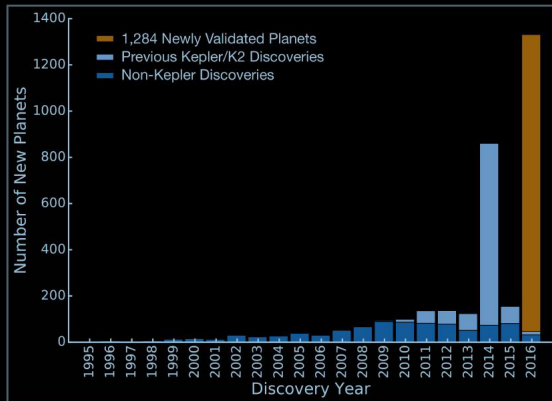
As of May 10, 2016



その後の発展

Exoplanet Discoveries Through the Years

As of May 10, 2016



- **2016**年時点で**3400**個ほどの系外惑星 (**2600**個の惑星系、**600**個の複数惑星をもつ星)
- **2000**個ほどは、系外惑星探査専用衛星「ケプラー」が発見したもの
- ケプラーで使っている方法: 「トランジット法」

トランジット法とは？

NASA のサイトのトランジット法説明動画

- 惑星が主星の前を通ると主星からの光を惑星がさえぎるので暗くなることを利用
- 惑星の軌道面が我々のほうを向いていないと観測できないが、向いていると観測しやすい。
- 衛星からだ、大気のゆらぎや雲等の影響がなく、ちょっと暗くなるだけでも観測できる。

惑星探査の方法

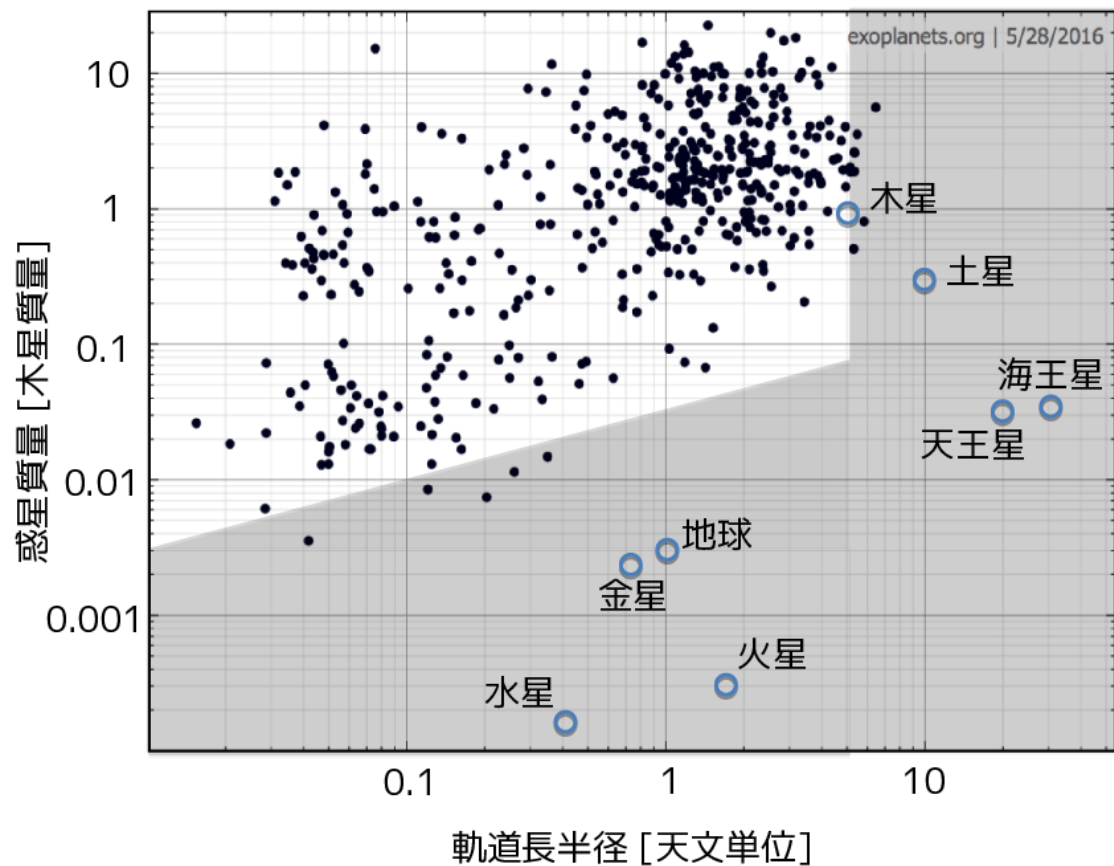
- 視線速度法
- トランジット法
- 直接撮像
- 重力レンズ

今後、直接撮像が発展すると期待。ハワイに建設中の **30m** 望遠鏡等

現在の理解と今後の発展

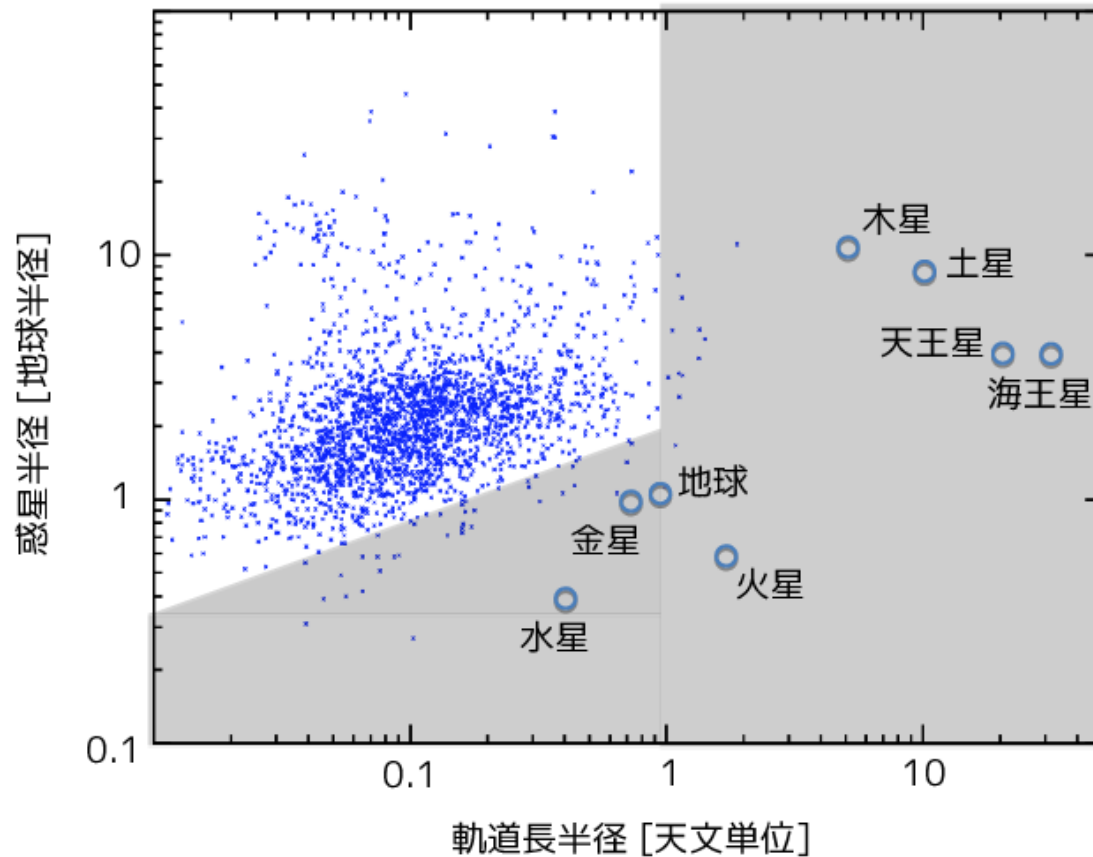
- 多様な系外惑星
- 理解、、、
- 今後の発展

多様な系外惑星



これは質量がわかっているもののみ (視線速度法)

多様な系外惑星(2)



これは半径がわかっているもののみ(トランジット法)

多様とはいえ、、、

- 質量と軌道半径では
 - 同じ軌道半径なら太陽系の惑星よりはるかに重いもの
 - 同じ質量なら太陽系の惑星よりはるか主星に近いもの
- 惑星半径と軌道半径では
 - 地球半径とかその数倍のものが多い。
 - **0.1 天文単位 (1500 万 km)** あたりが多いが、、、

我々(の太陽系)はすごく特殊か？

そうかもしれないが、「観測バイアス」も考えないといけない。

- 視線速度法では重い惑星、主星の近くの惑星がみつきやすい。特に、軌道周期が**20**年以上のものはまだ見つからない(観測が**95**年からなので、、、)
- トランジット法でも、大きな惑星、主星の近くの惑星(トランジットの回数が多い)がみつきやすい。ケプラー衛星の寿命より長い周期のものは惑星と確認できない。
- トランジット法の場合、さらに、トランジットが起こる確率が軌道半径に反比例するので、遠くの惑星はみつきにくくなる。

つまり: 現在のところ確かなことはいえない。理論・観測の発展を待つ必要あり。

理解

- 基本的に「大混乱中」
 - まだ何を説明するべきかよくわからない：系外惑星の「本当の」分布はまだ謎
 - とはいえ：これまでの惑星形成理論は基本的に我々の太陽系が対象。木星のような巨大惑星が主星のすぐ近くにあるとかは想定外
 - 離心率が大きい(細長い楕円軌道の)惑星も多数発見
- 様々な惑星系を統一的に説明できる理論体系が必要だが、、、

今後の発展

- 「惑星ができる過程」の直接観測(電波望遠鏡でのガス円盤の観測)
- より高精度な視線速度法、トランジット法、直接撮像による「観測バイアス」の影響の低減
- 理論・計算機シミュレーションによる惑星形成過程の再現

がこれから**10**年でかなり進むと期待、、、